

# Mécanique de la rupture : Ductilité, fragilité, ténacité et rupture

*Références*

*Chapitre 4*

*Chapitre 7 - section 7.4 (p. 285-295)*

4-1

- Eviter les défaillances
- Difficile de prévoir
- Choix de matériaux et conceptions doit être adéquat
- L'ingénieur doit prévoir les défaillances possibles
- Si elle arrive, déterminer les causes et prendre des mesures de prévention
- Ces défaillances peuvent arriver de différentes façons : rupture, fatigue
- Aujourd'hui nous allons voir la rupture

4-2

Beaucoup de **réponses** liées à la **rupture** des matériaux se trouvent dans la simple compréhension des **mécanismes** de **rupture**!

4-3

## Quelques exemples

---

Les bateaux construits pendant la Seconde Guerre mondiale : Liberty Ship (1942 à 1952 : 1000 ruptures significatives sur 5000 bateaux construits)



[http://en.wikipedia.org/wiki/Liberty\\_ship](http://en.wikipedia.org/wiki/Liberty_ship)

4-4

## Quelques exemples

Le viaduc du boulevard de la Concorde s'écrase à Laval (sept. 2006)



Source, La presse

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Viaduc\\_de\\_la\\_Concorde](http://fr.wikipedia.org/wiki/Viaduc_de_la_Concorde)

4-5

## Quelques exemples

Minneapolis (Minnesota), au-dessus du fleuve Mississippi (août 2007).



1964-2007



Source,  
La presse



Source, La presse



[http://en.wikipedia.org/wiki/I-35W\\_Mississippi\\_River\\_bridge](http://en.wikipedia.org/wiki/I-35W_Mississippi_River_bridge)

4-6

# Propriétés mécaniques

Propriétés	Caractérise	Mesurée par
Rigidité	Intensité des liaisons	Essai de traction : modules d'élasticité (E, G)
Résistance	Contrainte maximale appliquée pour rompre le matériau	Essai de traction : résistance à la traction ( $R_m$ )
	Transition élastique – plastique	Essai de traction : limite conventionnelle d'élasticité ( $R_{e0.2}$ )
Ténacité	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacité d'emmagasinage de l'énergie</li> <li>• Résistance à la propagation des fissures</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Essai de traction (aire sous la courbe)</li> <li>• Essai Charpy</li> </ul>
Ductilité	Capacité du matériau à se déformer de façon plastique avant la rupture	Essai de traction : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Allongement à la rupture (A%)</li> <li>• Striction à la rupture (Z%)</li> </ul>

4-7

# Objectifs

- Rupture
  - Rupture ductile
  - Rupture fragile
- Ductilité
- Transition ductile-fragile
- Ténacité
  - Définition
  - Mesures
- Fracture
  - Concentration des contraintes :  $K_t$
  - Facteur d'amplification des contraintes
  - Comment améliorer la résistance à la fracture?

4-8

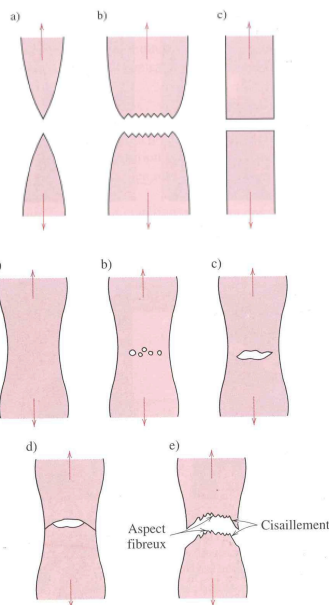


# Objectifs

- Rupture
  - Rupture ductile
  - Rupture fragile
- Ductilité
- Transition ductile-fragile
- Ténacité
  - Définition
  - Mesures
- Fracture
  - Concentration des contraintes :  $K_t$
  - Facteur d'amplification des contraintes
  - Comment améliorer la résistance à la fracture?

4-9

## Modes de rupture des matériaux

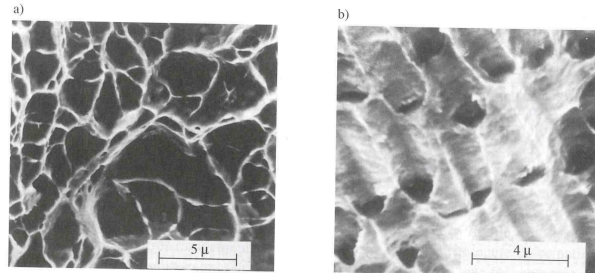
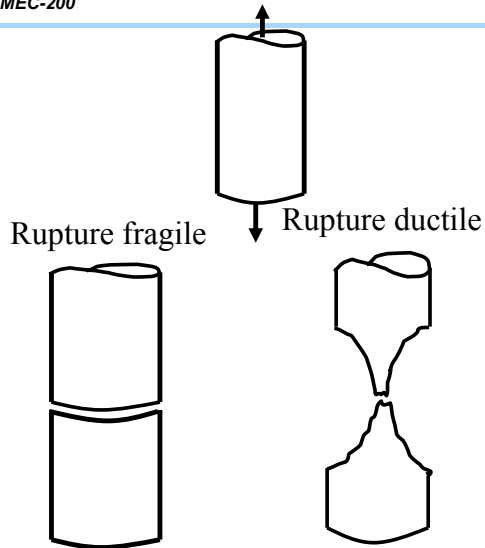


Séparation d'un corps en plusieurs parties sous l'action d'une contrainte de nature statique

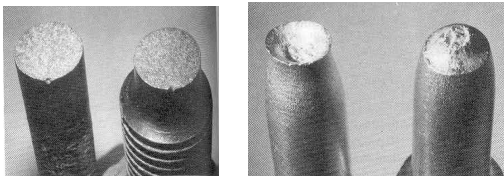
Rupture ductile: lente vaste déformation plastique

Rupture fragile: très rapide et catastrophique, propagation d'une fissure

## Modes de rupture des matériaux – rupture ductile



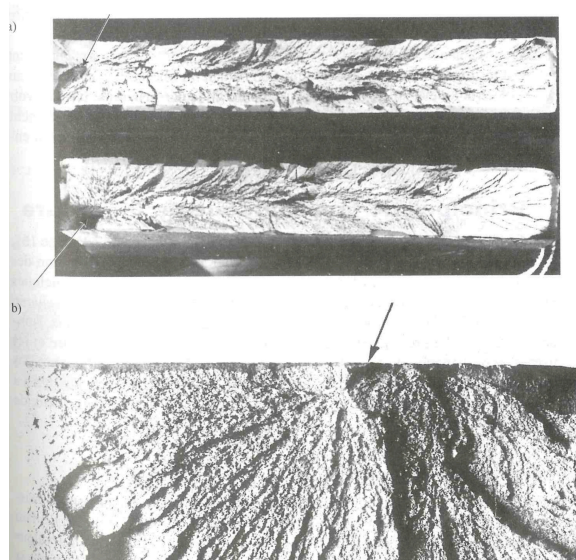
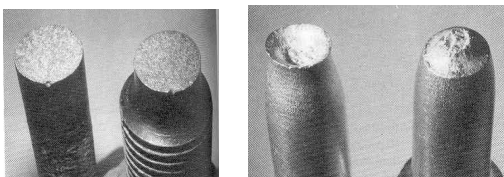
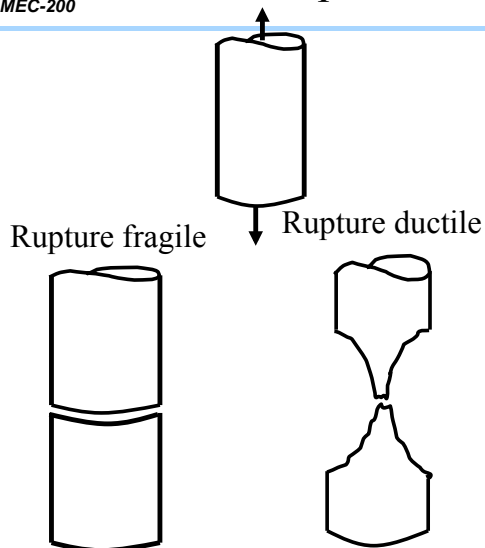
**FIGURE 8.4** a) Fractographie obtenue au microscope électronique à balayage montrant les cupules sphériques qui caractérisent une rupture ductile consécutive à l'application de charges de traction uniaxiales. Facteur d'agrandissement: 3300. b) Fractographie obtenue au microscope électronique à balayage montrant les cupules paraboliques qui caractérisent une rupture ductile résultant d'une charge de cisaillement. Facteur d'agrandissement: 5000. Tiré de R.W. HERTZBERG, *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, 3<sup>e</sup> éd. © 1989, John Wiley & Sons, New York. Reproduction autorisée par John Wiley & Sons, Inc.



Source: Calister- *Materials Science and Engineering*

4-11

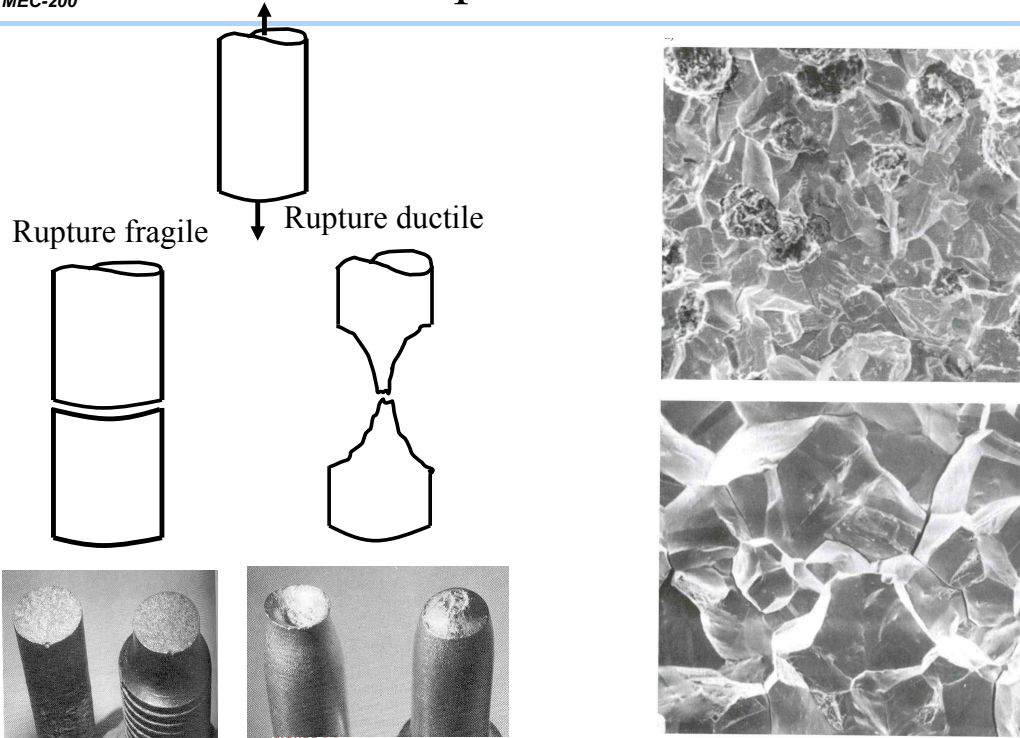
## Modes de rupture des matériaux – rupture fragile



Source: Calister- *Materials Science and Engineering*

4-12

# Modes de rupture des matériaux



Source: Calister- Materials Science and Engineering, 8th Edition, Wiley, 2003. -13

## Objectifs

- Rupture
  - Rupture ductile
  - Rupture fragile
- Ductilité
- Transition ductile-fragile
- Ténacité
  - Définition
  - Mesures
- Fracture
  - Concentration des contraintes :  $K_t$
  - Facteur d'amplification des contraintes
  - Comment améliorer la résistance à la fracture?

# La ductilité

- **Qualité des matériaux à être déformés de façon permanente sans se rompre.**
- La ductilité d'un matériau se mesure par son allongement à la rupture (A%) ou par la striction à la rupture (Z %)

Allongement  
à la rupture

$$A\% = \frac{L_f - L_0}{L_0} \cdot 100$$

Striction  
à la rupture

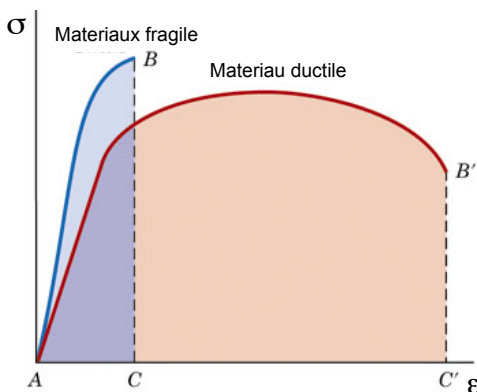
$$Z\% = \frac{S_0 - S_f}{S_0} \cdot 100$$

$S_0$  ( $S_f$ ) sections initiales (finales) de l'éprouvette

4-15

## Matériaux ductiles et fragiles

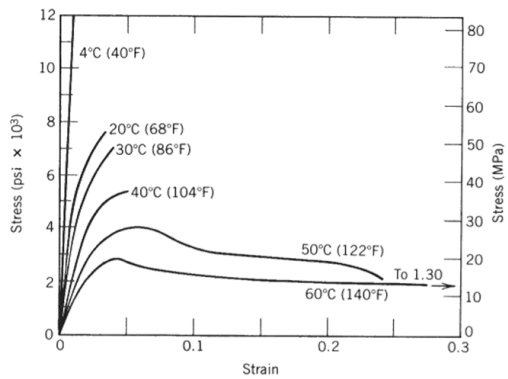
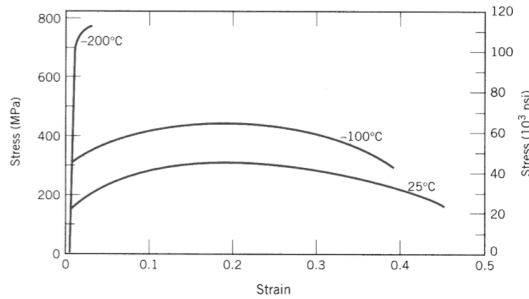
16



- Important pour le service, pour la conformation
- Matériaux fragiles, allongement à la rupture inférieur à 5%.

## Acrilique

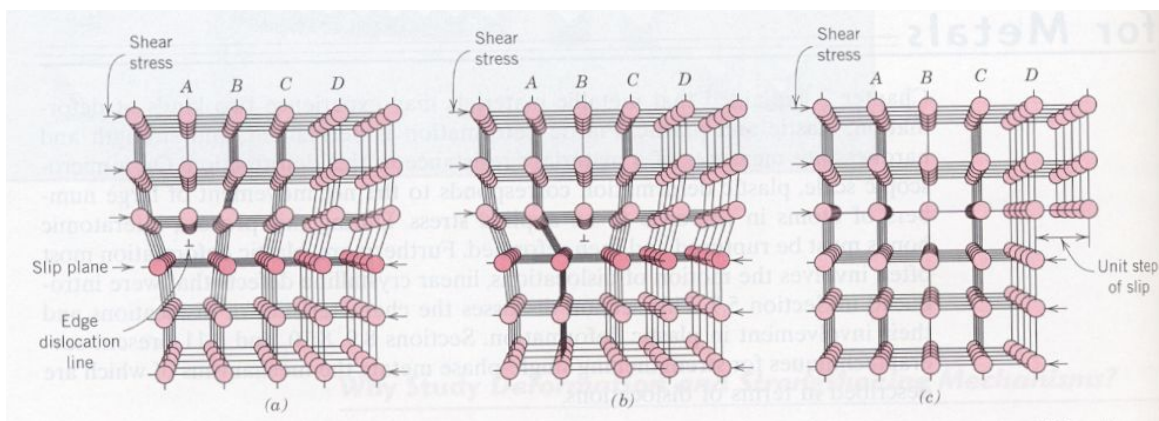
## Fer



Source: W.D. Callister Jr. Science et Génie des Matériaux

4-17

# Ductilité



Source: Callister- Materials Science and Engineering

4-18

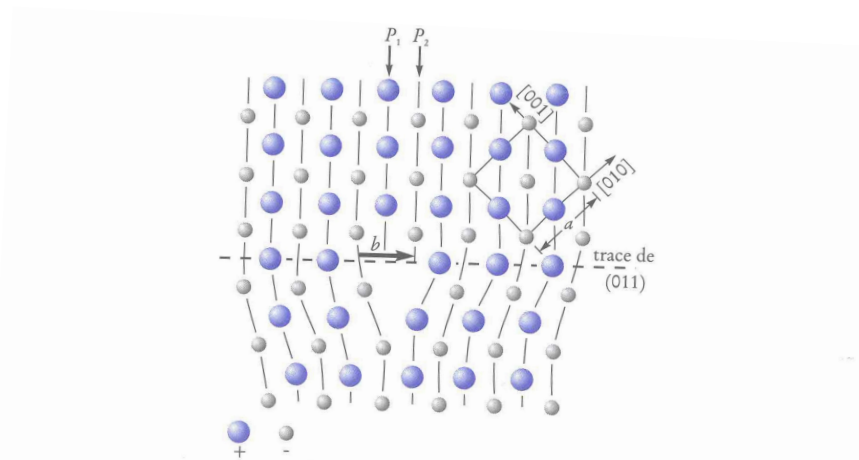


Figure 4.28 Configuration d'une dislocation-coin dans le NaCl. Pour que l'équilibre des charges électrostatiques soit respecté, la dislocation est constituée de deux demi-plans supplémentaires.

Source: J.M. Dorlot des Matériaux

4-19

## Ductilité - Exercice

On soumet une éprouvette cylindrique en acier d'un diamètre initial de 12,8 mm à un essai de traction jusqu'à la rupture. On établit que la résistance à la rupture conventionnelle  $R_m$  est de 460 MPa. Le diamètre de la section à la rupture est de 10,7 mm. Calculez :

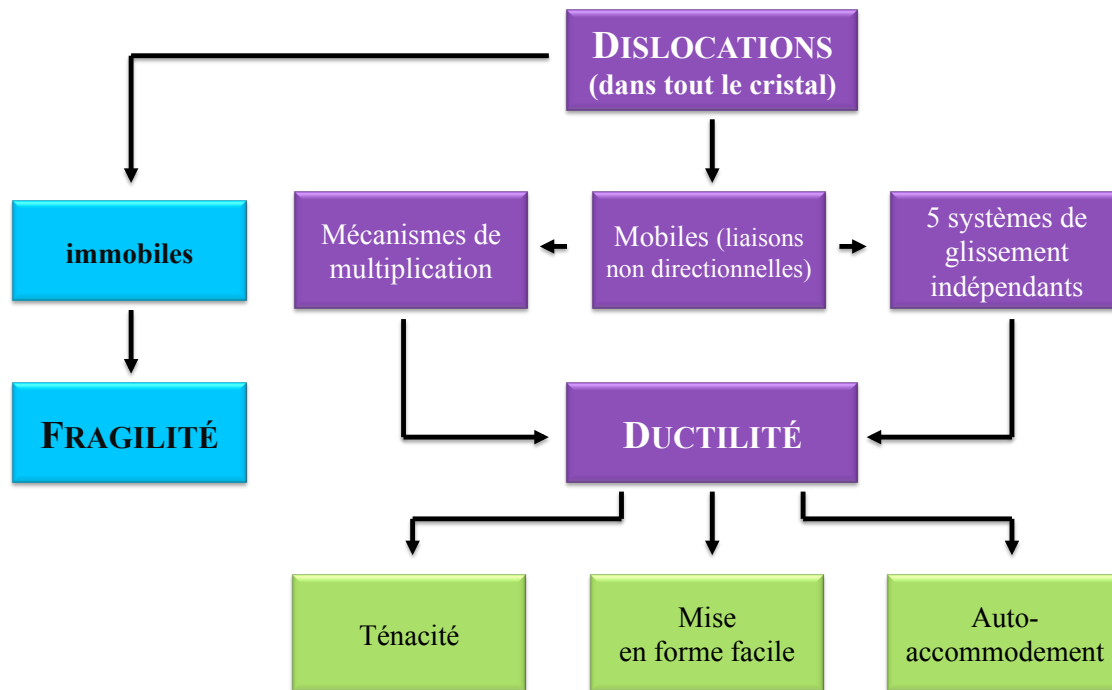
- La ductilité exprimée par le pourcentage de striction
- La contrainte réelle à la rupture

Source: W.D. Callister

4-20



# Conditions pour assurer la ductilité



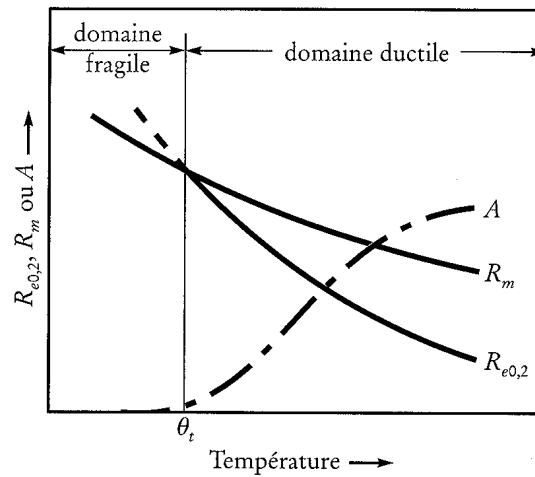
4-21

## Objectifs

- Rupture
  - Rupture ductile
  - Rupture fragile
- Ductilité
- Transition ductile-fragile
- Ténacité
  - Définition
  - Mesures
- Fracture
  - Concentration des contraintes :  $K_t$
  - Facteur d'amplification des contraintes
  - Comment améliorer la résistance à la fracture?

4-22

# Temp. de transition ductile-fragile



**Figure 7.13** Variation de la limite d'élasticité,  $R_{e0,2}$ , de la résistance à la traction,  $R_m$ , et de l'allongement à la rupture,  $A$ , en fonction de la température de l'essai de traction.

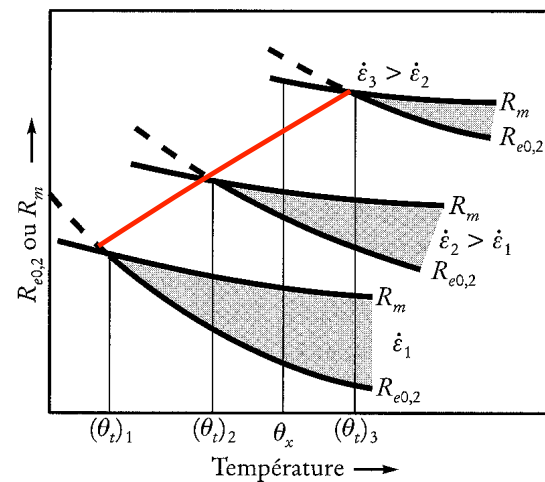
Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

4-23

## TTDF et vitesse de déformation

### Remarques :

- La TTDF augmente quand la vitesse de sollicitation augmente.
- A une même température, un matériau peut être ductile pour de faibles vitesses de sollicitation et fragile pour de grandes vitesses de sollicitation.



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

4-24

# Effet de l'entaille

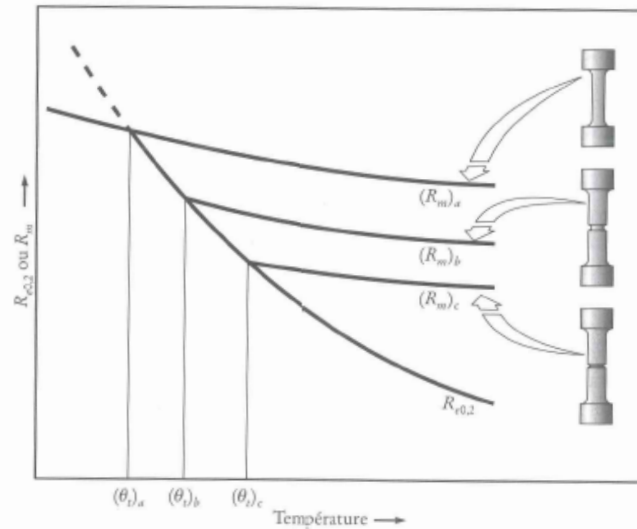


Figure 7.15 Influence d'une entaille sur la variation de la résistance à la traction,  $R_m$ , en fonction de la température. Plus l'entaille est aiguë, plus la température de transition ductile-fragile,  $\theta_p$ , est élevée.

Source: Bailon et Dorlot, Des Matériaux

4-25

## Objectifs

- Rupture
  - Rupture ductile
  - Rupture fragile
- Ductilité
- **Ténacité**
  - Définition
  - Mesures
  - Facteurs qui influencent la ténacité
- Fracture
  - Concentration des contraintes :  $K_t$
  - Facteur d'amplification des contraintes
  - Comment améliorer la résistance à la fracture?

4-26

## Ténacité

- Capacité d'un matériau à absorber de l'énergie avant sa rupture



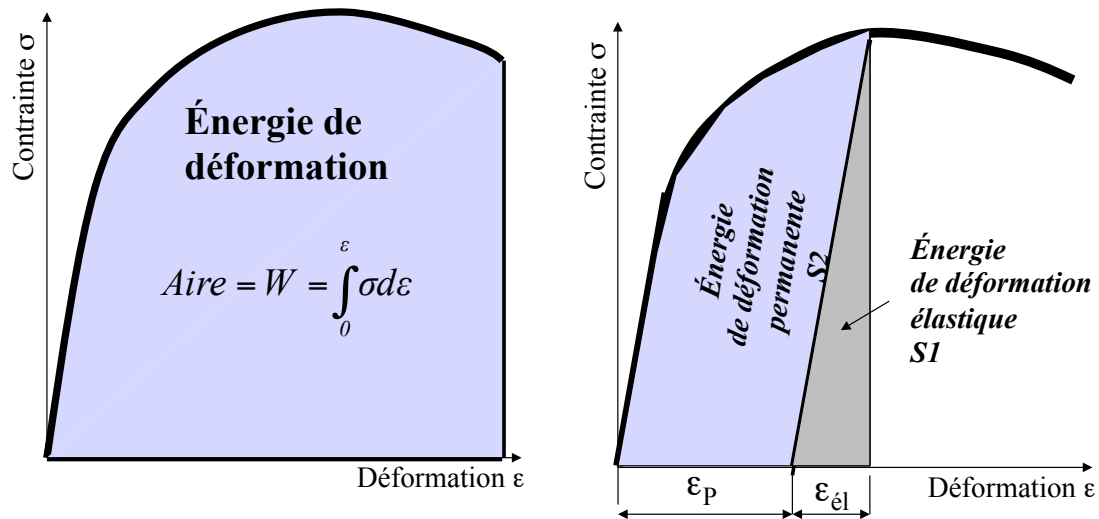
	E (GPa)	R <sub>m</sub> (MPa)	A(%)	Ténacité
Plastique	2	10	15	Ex
Verre	65	35	0,1	faible
Aluminium	70	50	25	Ex

4-27

## Ténacité

- Mesure de la ténacité
  - Essai de traction (aire sous la courbe)
  - Essai Charpy

## Rappel - Énergie de déformation



Dans le domaine élastique 
$$W = \int_0^{\varepsilon} \sigma d\varepsilon = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon = \frac{\sigma^2}{2E}$$

4-29

## Ténacité

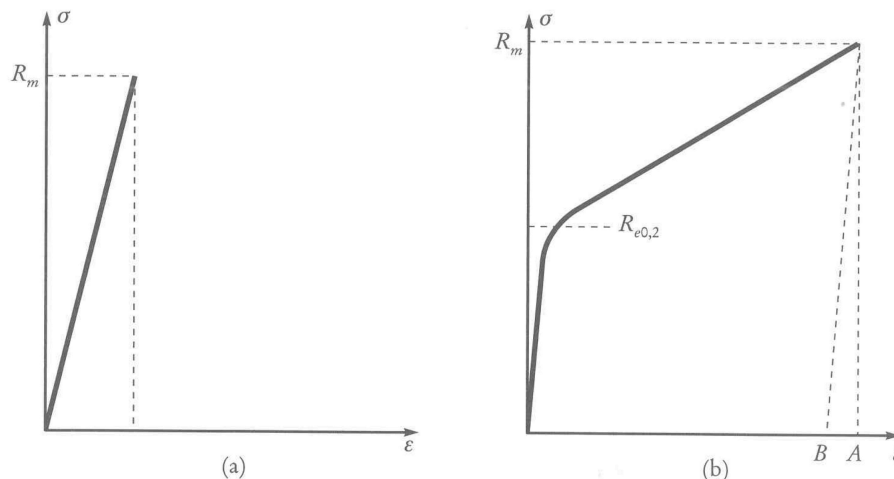
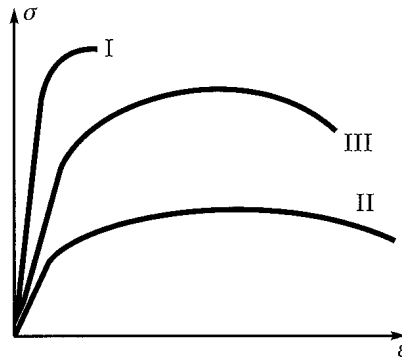


Figure 4.46 Évaluation de la ténacité : a) d'un matériau fragile ; b) d'un matériau ductile à consolidation linéaire.

$$S = 1 / 2 A (R_{e0,2} + R_m)$$

# Comparaison de ténacité



**Figure 4.47** Comparaison de la ténacité de trois matériaux (I, II et III), grâce à l'aire sous leur courbe de traction.

Source: Bailon et Dorlot, *Des Matériaux*

4-31

## Essai de résilience

- Impact soudain et beaucoup plus intense.
  - Vitesses de déformation de l'ordre de  $10^3 \text{ s}^{-1}$ .
- Matériau aura un comportement beaucoup plus fragile.
- Cet essai nous permettra d'évaluer la température de transition ductile-fragile.

4-32

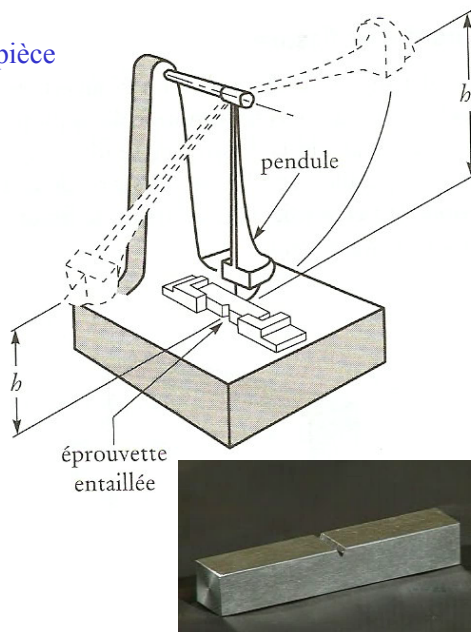
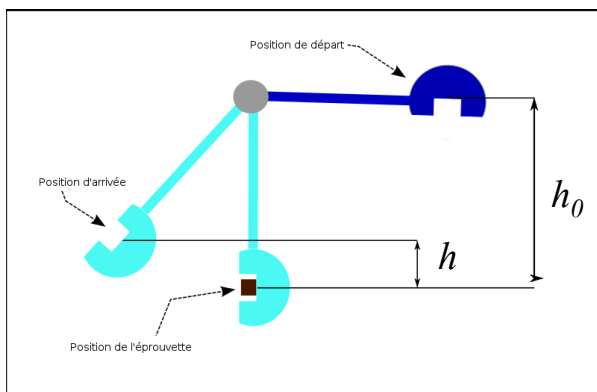


## Essai Charpy (résilience)

La **résilience** est l'énergie nécessaire à rompre une pièce selon une section unité ( $\text{J}/\text{cm}^2$ ).

$$K = mgh_0 - mgh$$

ASTM E23 : Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials.

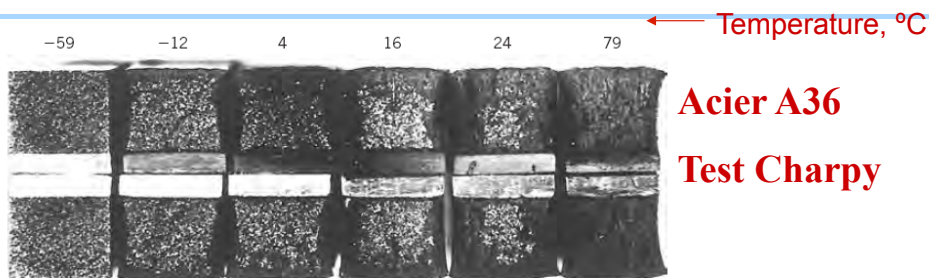


Éprouvette Charpy

Source: W.D. Callister Jr. Science et Génie des Matériaux

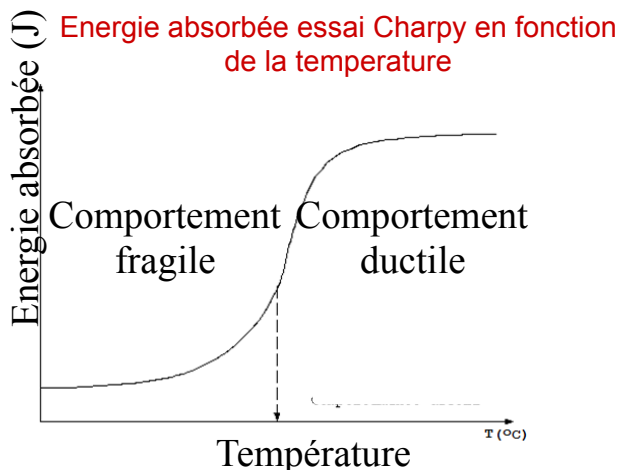
4-33

## Transition fragile-ductile



Acier A36

Test Charpy



Source: W.D. Callister Jr. Science et Génie des Matériaux

4-34

## Temp. de transition ductile-fragile

### Température de transition ductile – fragile : TTDF

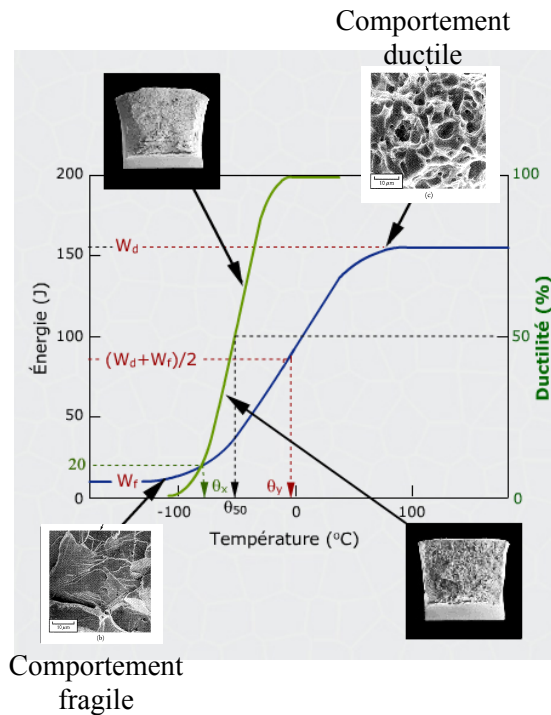
Plusieurs façon de la définir

$$\text{Pour } \left( \frac{W_f - W_d}{2} \right) \Rightarrow TTDF = \theta_y$$

$$\text{Pour } W = 28J \Rightarrow TTDF = \theta_x$$

$$\text{Pour } 50\% \text{ ductilité} \Rightarrow TTDF = \theta_{50}$$

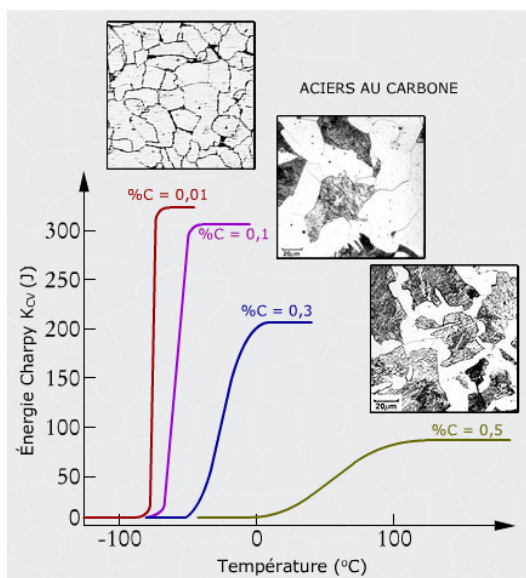
Comme  $\theta_x \neq \theta_y \neq \theta_{50}$ , il faut préciser le critère de sélection de la TTDF



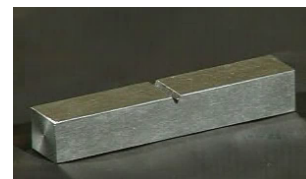
Source: Bailon et Dorlot, Des Matériaux

4-35

## Essai Charpy



Énergie :  $W = mg (h_0 - h_1)$   
Matériau peu tenace  $h_0 \approx h_1$   
Matériau très tenace:  $h_1 \ll h_0$



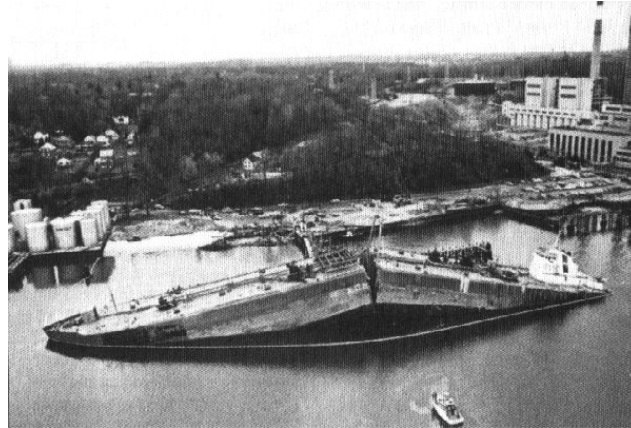
Éprouvette Charpy

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

4-36

## Transition fragile-ductile

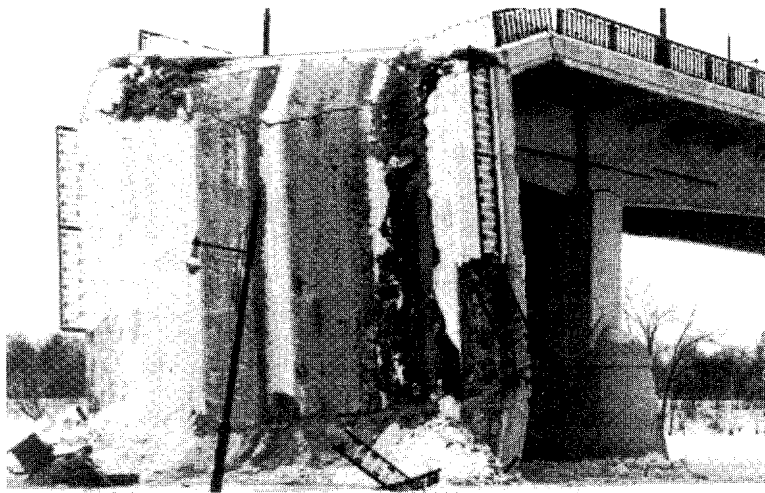
- On ne doit pas construire des structures en utilisant des matériaux qui présentent une température de transition fragile-ductile et au dessus de la température d'utilisation si nous voulons éviter les catastrophes.



Source: W.D. Callister Jr. Science et Génie des Matériaux

4-37

## Pourquoi la ténacité est importante à considérer?



**Figure 7.19** Rupture du pont de Trois-Rivières (31 janvier 1951). La structure métallique s'est rompue fragilement par une nuit d'hiver ( $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), alors que le pont n'était que faiblement chargé.

Source: Calister- Materials Science and Engineering

4-38

## Exercice

### EXERCICE 7-8

Vous désirez déterminer la température de transition d'un acier. Vous avez fait usiner 15 éprouvettes et vous demandez à votre technicien d'effectuer 3 essais à 5 températures différentes échelonnées entre  $-60^{\circ}$  et  $+20^{\circ}\text{C}$ . Votre technicien effectue les essais en mesurant la hauteur de remontée maximum ( $h$ ) du pendule; celui-ci tombe d'une hauteur initiale  $h_0 = 80$  cm.

Déterminez la température de transition de l'acier en question à partir des résultats donnés ci-dessous. La température de transition sera définie par l'énergie moyenne entre celles du plateau ductile et du plateau fragile.

Données :

Température ( $^{\circ}\text{C}$ )	Hauteur $h$ (cm)
-60	70; 75; 65
-40	65; 60; 70
-20	20; 55; 25
0	5; pas rupture; 10
+20	5; 5; pas rupture

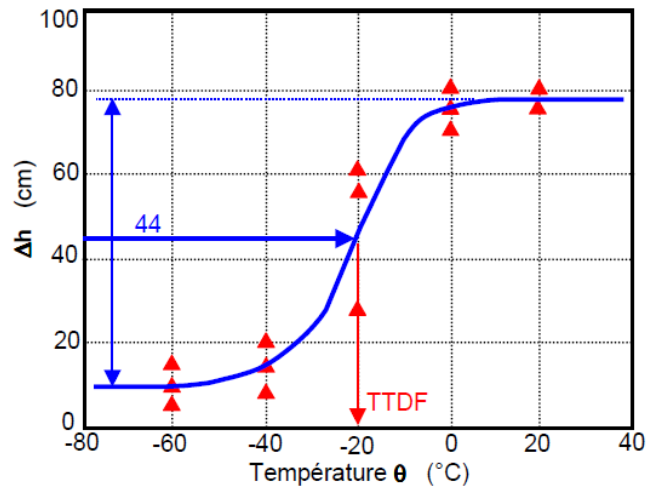
Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

4-39

## Solution

### a) Détermination de la température de transition Ductile – Fragile

Puisque l'énergie absorbée pour rompre une éprouvette Charpy est proportionnelle à la variation de hauteur  $\Delta h = (h_0 - h)$  du pendule au cours de l'essai, il suffit de tracer la courbe  $\Delta h = f(\theta)$  pour déterminer alors la TTDF de l'acier.



Puisque le critère de définition de la TTDF est l'énergie moyenne entre le plateau ductile et le plateau fragile, on définit ce niveau d'énergie à 44 cm  $[(78 + 10)/2]$ ; ce qui permet d'en déduire une TTDF égale à  $-20^{\circ}\text{C}$ .

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

4-40

# Objectifs

---

- Rupture
  - Rupture ductile
  - Rupture fragile
- Ductilité
- Transition ductile-fragile
- Ténacité
  - Définition
  - Mesures
- Fracture
  - Concentration des contraintes :  $K_t$
  - Facteur d'amplification des contraintes
  - Comment améliorer la résistance à la fracture?

4-41

## Introduction du concept de concentration de contraintes

---

### Cas des matériaux fragiles

On peut montrer (voir section 2.24) que la résistance à la traction théorique d'un matériau est d'environ  $E/3$  à  $E/10$

Prenons l'exemple d'un fil de verre de section  $1 \text{ cm}^2$

Module  $E = 70 \text{ GPa}$

$R_m = 7 \text{ GPa}$

$R_m = F/A$

$F = 700000 \text{ N} = 70 \text{ tonnes}$

4-42

## Cas des matériaux fragiles

### Hypothèse de Griffith :

Bien que la contrainte externe n'atteigne pas la résistance théorique en traction, il existe des endroits dans le matériau où cette contrainte théorique est atteinte.

### Vérification expérimentale :

Des fibres de verre fraîchement produites ont une résistance mécanique voisine de  $E/10$ . Des fibres de verre rayées ont une résistance mécanique nettement plus faible.

4-43

## Facteur de concentration de contrainte $K_t$

### Expression de la composante locale $\sigma_y$

$$\sigma_y = \sigma_{nom} \left( 1 + 2\sqrt{\frac{a}{r}} \right)$$

$a$  : profondeur de la fissure (mm)

$r$  : rayon de courbure à la racine de la fissure (mm)

$\sigma_{nom}$  : contrainte nominale extérieure appliquée (MPa)

### Facteur de concentration de contrainte

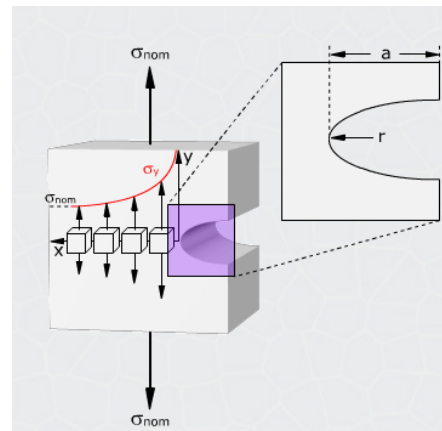
représente le degré auquel une contrainte externe s'amplifie à l'extrémité d'une fissure

$$K_t = \left( 1 + 2\sqrt{\frac{a}{r}} \right)$$

$K_t$  est défini par les paramètres géométriques :  $a$  et  $r$ .

### Rupture fragile brutale du matériau lorsque :

$$\sigma_y = K_t \sigma_{nom} \geq R_{th}$$





## Exercice

Une céramique avancée possède une résistance à la traction de 60.000 psi. Imaginons que cela soit une céramique sans défauts.

Une fissure fine de profondeur 0.01 pouce est observée avant que l'éprouvette soit testée.

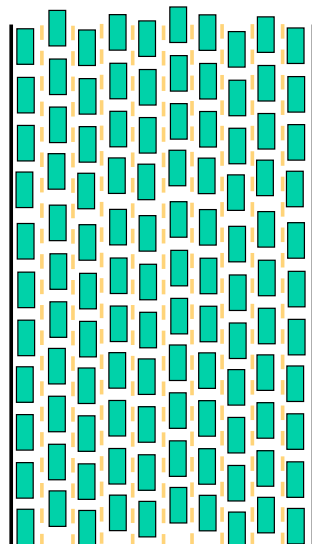
L'éprouvette cède à une tension de 500 psi par propagation de fissure. Estimer le rayon de la fissure.

$$\sigma_{reelle} = 2\sigma\sqrt{a/r}$$

4-45

## Analogie

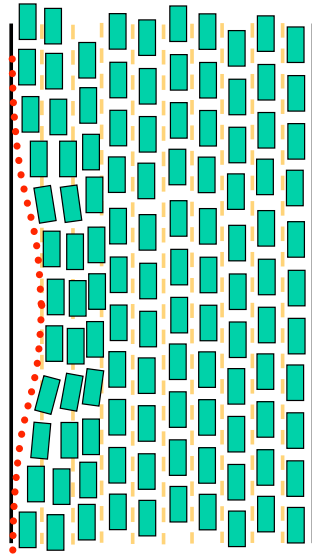
Supposons une autoroute à 10 voies



4-46

## Analogie

Cas no. 1 : la voie est fermée 1 km en amont et en aval

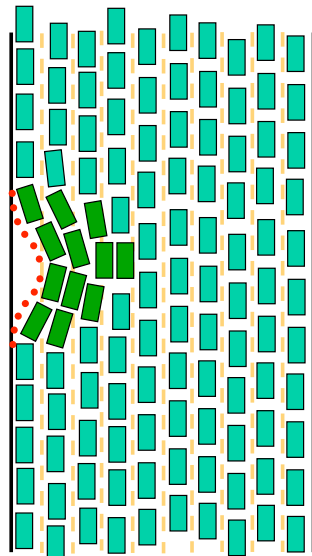


La densité de voitures augmente légèrement dans les 3 voies adjacentes

4-47

## Analogie

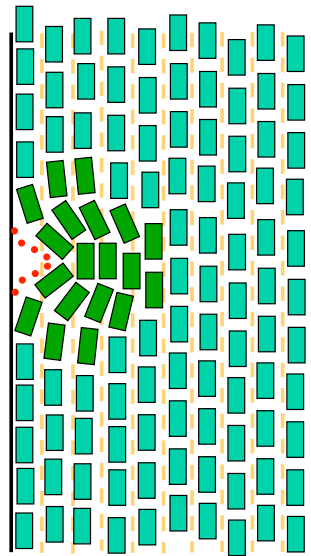
Cas no. 2 : la voie est fermée 0.25 km en amont et en aval



La densité de voitures augmente dans les 4 voies adjacentes

4-48

Cas no. 3 : la voie est fermée 0.1 km en amont et en aval



La densité de voitures augmente dans les 5 voies adjacentes

4-49

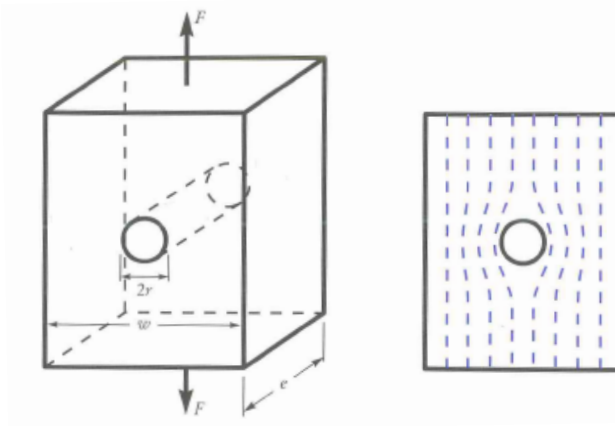
Bien qu'à l'infini la densité de voitures reste inchangée, la densité locale est nettement plus grande à mesure que la voie est fermée sur une courte distance. De ceci, on comprend bien que, si le nombre de voies fermées augmente, la densité locale sera plus grande.

Si nous transposons ceci en terme de défaut de surface, nous remarquons que :

- Plus le rayon de courbure à fond d'entaille diminue et plus la concentration de contrainte augmente.
- Plus la profondeur du défaut augmente, plus la concentration de contrainte augmente.

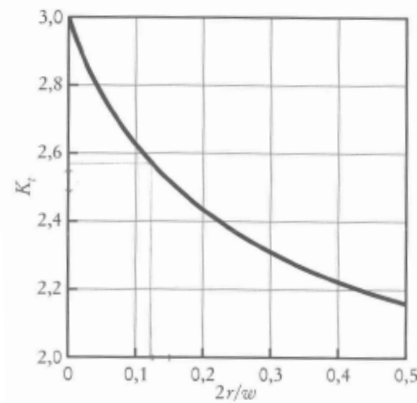
4-50

## Coefficient de concentration de contrainte dû à la géométrie



Si le défaut est de taille négligeable par rapport à taille du solide  $K_t=3$

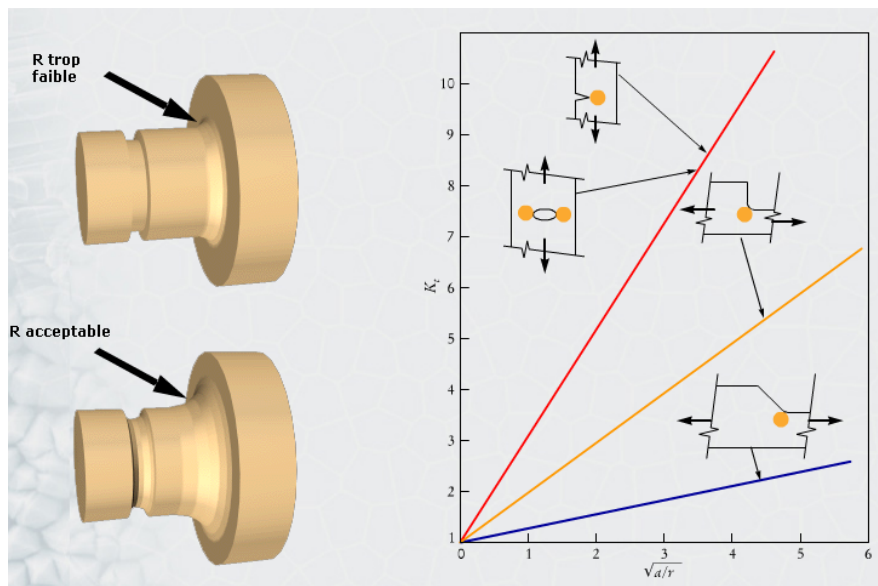
Sinon cela dépendra de la taille de la pièce



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

4-51

## Coefficient de concentration de contrainte dû à la géométrie



Plus  $K_t$  est grand et plus la contrainte locale le sera :  $\sigma_y = K_t \sigma_{nom}$

**Attention lors de la conception**

Figure 4.6

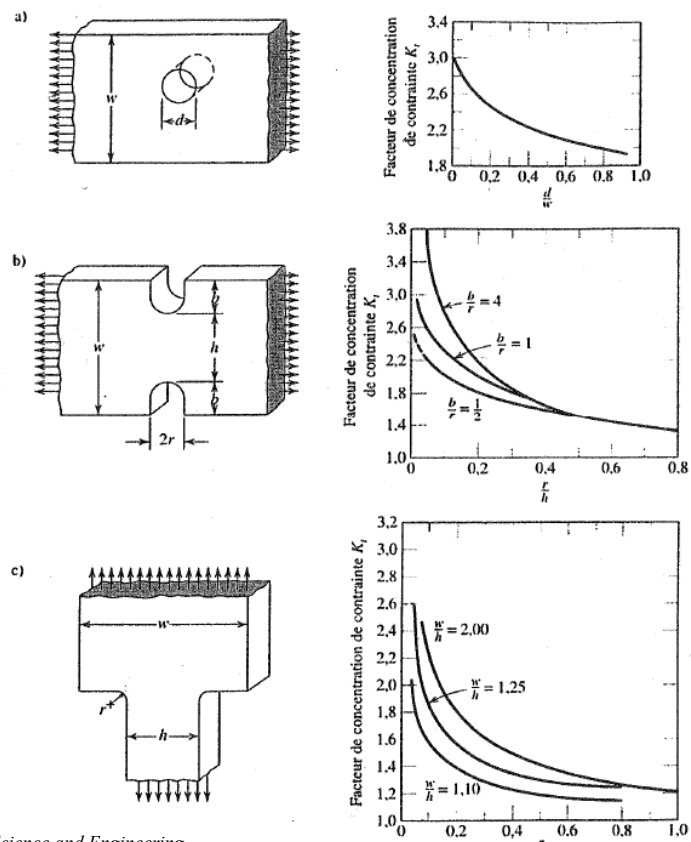
Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

4-52

La résistance d'une pièce dépend des :

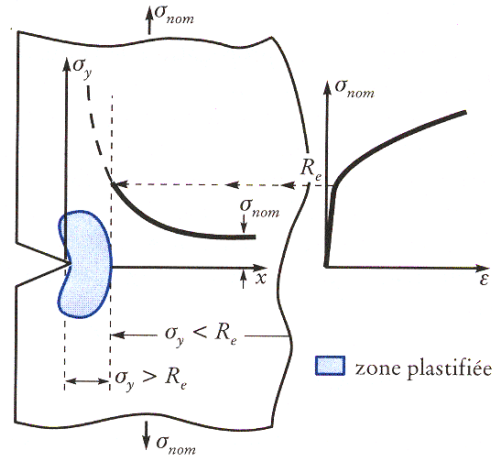
- défauts dans le matériau
- de la nature du matériau
- de la géométrie

4-53



Source: Calister- Materials Science and Engineering

# Matériaux ductiles : Zone plastifiée en fond de fissure

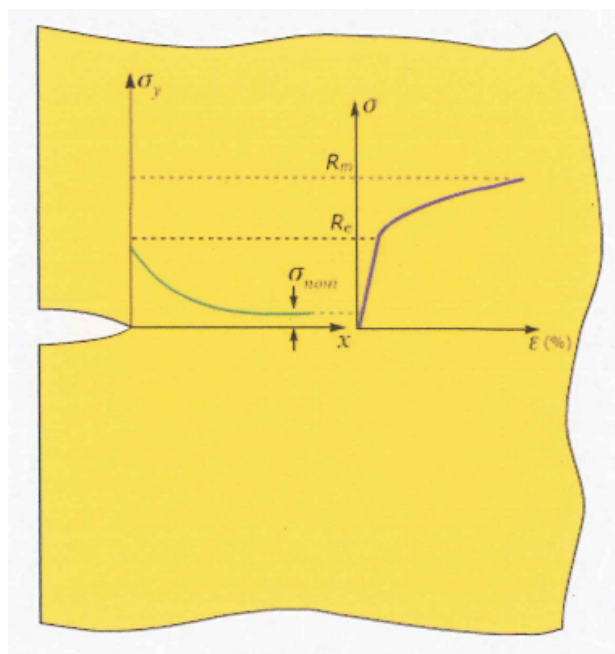


**Figure 4.42** Représentation schématique de la formation d'une zone plastifiée en fond de fissure, dans un matériau ductile. Lorsque la valeur de la contrainte locale  $\sigma_y$  dépasse celle de la limite d'élasticité  $R_e$  du matériau, la zone dans laquelle  $\sigma_y$  est supérieure à  $R_e$  est déformée plastiquement, alors que, plus loin de la fissure, le matériau ne subit qu'une déformation élastique.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

4-55

# Matériaux ductiles :

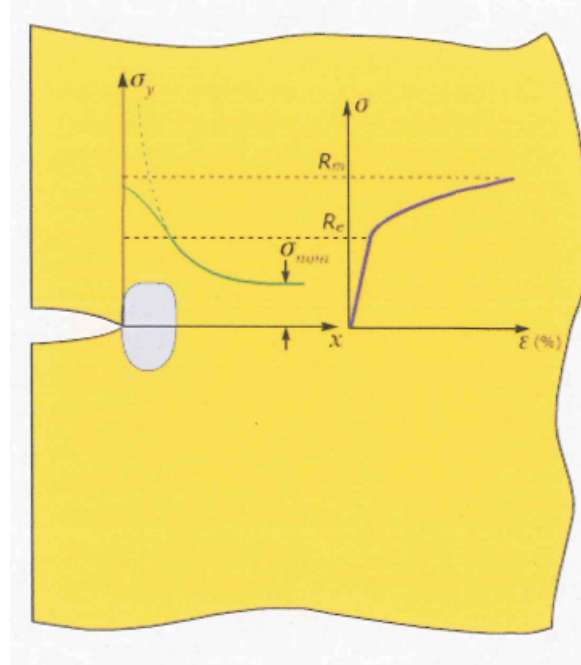


Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

4-56



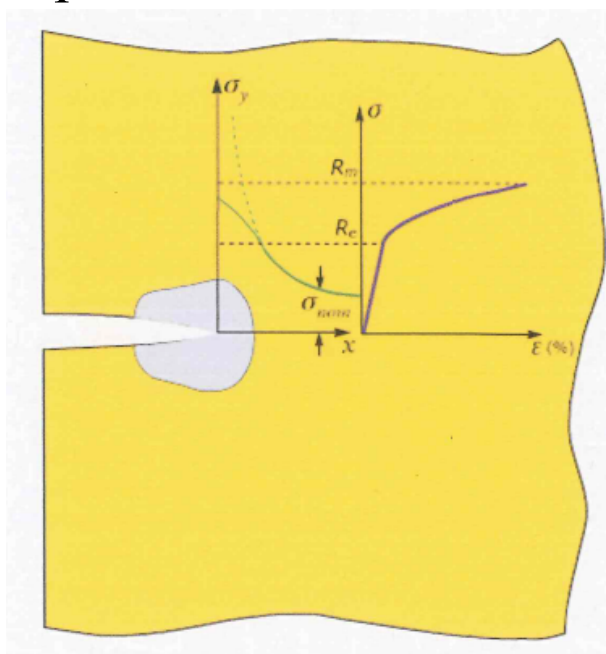
## Matériaux ductiles : Zone plastifiée en fond de fissure



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

4-57

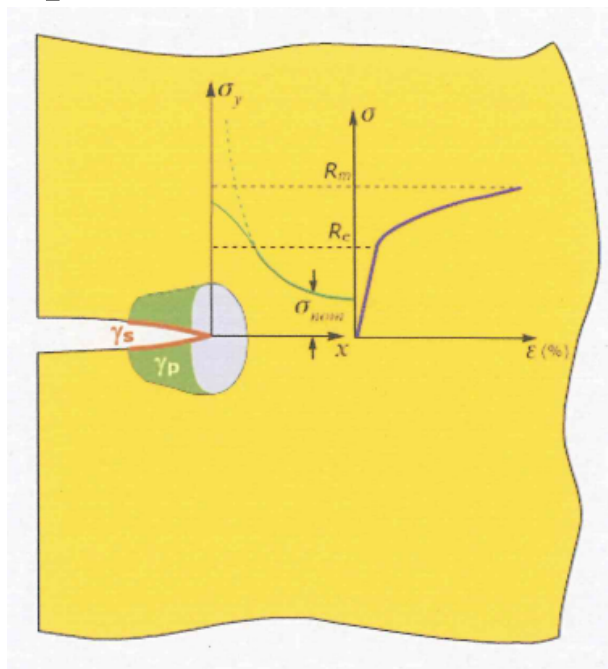
## Matériaux ductiles : Zone plastifiée en fond de fissure



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

4-58

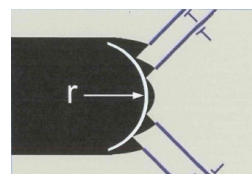
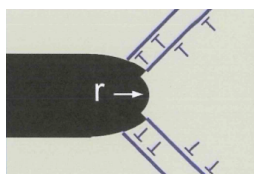
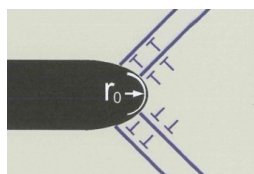
## Matériaux ductiles : Zone plastifiée en fond de fissure



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

4-59

## Matériaux ductiles : Zone plastifiée en fond de fissure



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

4-60

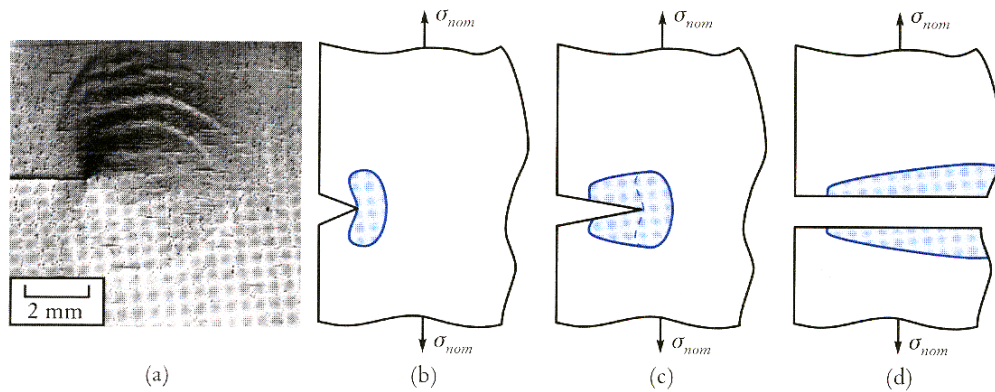


Figure 4.43 a) Aspect d'une zone plastifiée en tête d'une fissure dans un acier doux. b) Plastification à fond de fissure. c) Durant la propagation de la fissure, la zone plastifiée associée se déplace. d) Après rupture, un certain volume de matériau (zones tramées) a été déformé plastiquement de façon irréversible.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

4-61

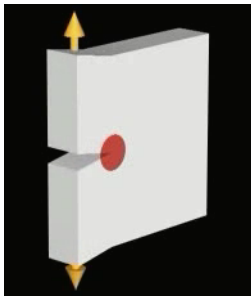
## Objectifs

- Rupture
  - Rupture ductile
  - Rupture fragile
- Ductilité
- Transition ductile-fragile
- Ténacité
  - Définition
  - Mesures
- Fracture
  - Concentration des contraintes :  $K_t$
  - Facteur d'amplification des contraintes
  - Comment améliorer la résistance à la fracture?

4-62

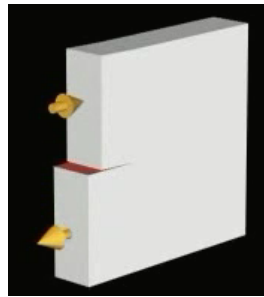
# Modes d'ouverture des fissures

## Mode I



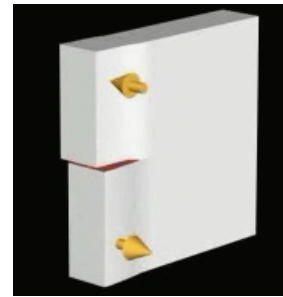
Contrainte de traction  
appliquée  
perpendiculairement au  
plan de la fissure

## Mode II



Cission dans le plan de la  
fissure et appliquée  
perpendiculairement au  
front de la fissure

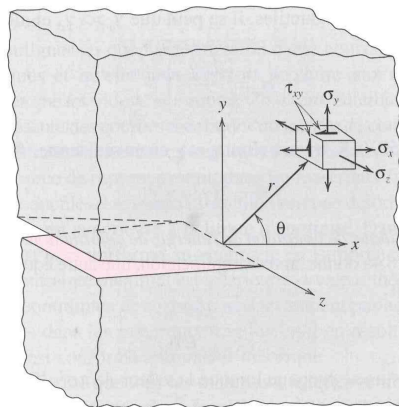
## Mode III



Cission dans le plan de la  
fissure et appliquée  
parallèlement au front de  
la fissure

**Mode I étant le plus dangereux => liaisons atomiques  
en tête de fissure sont sous tension  
Mode II et III => force de frottement**

4-63



$$\sigma_x = K \frac{f_x(\theta)}{\sqrt{2\pi r}}$$

$$\text{ou } K = \alpha \sigma \sqrt{\pi a}$$

K facteur d'intensité de contrainte  
<K>=MPa.m<sup>-1/2</sup>

α :Paramètre sans dimension fonction  
de la taille et géometrie de  
l'éprouvette

La rupture se produit si

$\sigma > \sigma_c$  ou encore si

on peut donc définir

$$K_c = \alpha(a / W) \sigma_c \sqrt{\pi a}$$

$$\sigma_x = K \frac{f_x(\theta)}{\sqrt{2\pi r}}$$

$$\text{ou } K = \alpha \sigma \sqrt{\pi a}$$

Facteur critique d'intensité de contrainte

4-65

## Facteur critique d'intensité en déformation plane

Matériau	$K_{Ic} (MPa\sqrt{m})$
Alliage d'aluminium (7075-T651)	24
Alliage de titane (Ti-6Al-4V)	55
Béton	0,2-1,4
Verre	0,7-0,8
PS	0,7-1,1
PMMA	0,7-1,6
PC	2.2

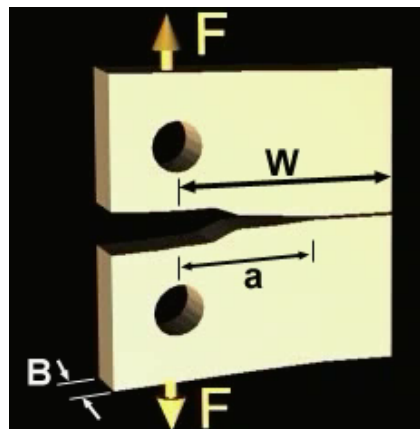
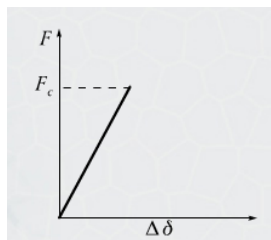
# Mesure du $K_{IC}$

## Échantillon : éprouvette normalisée CT

$a$  : longueur initiale de la fissure

## Contrainte produisant la rupture brutale de l'éprouvette

$$\sigma_c = \frac{F_c}{BW}$$



## Facteur d'intensité des contraintes : $K_{IC}$

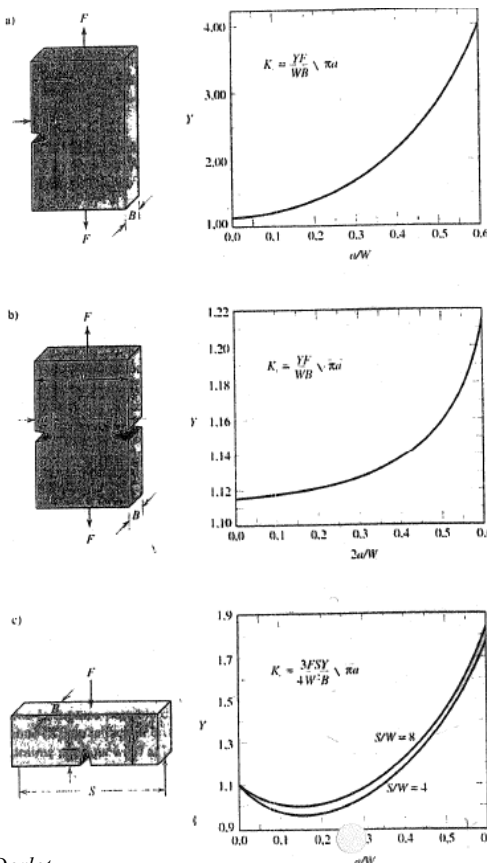
$$K_c = \alpha \sigma_c \sqrt{\pi a} \left( \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \right)$$

$\alpha = f(a, W)$  Facteur correctif sans dimension

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

4-67

Valeurs de  $\alpha$  à l'annexe H



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

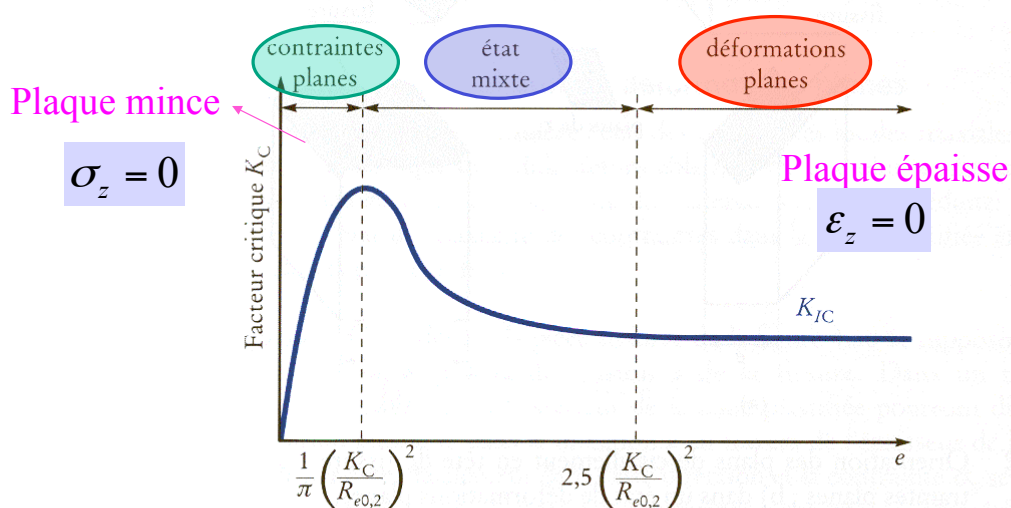
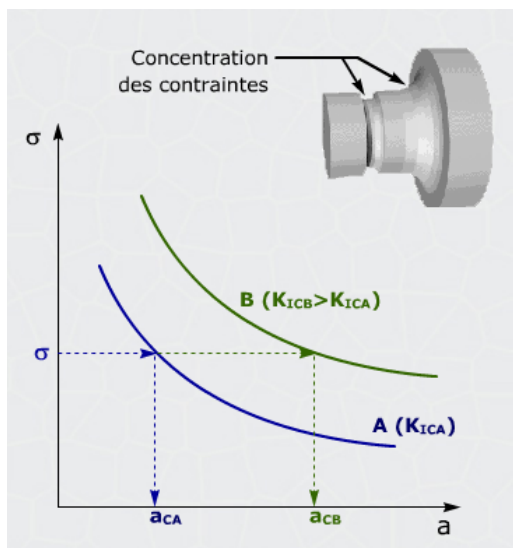


Figure 4.53 Influence de l'épaisseur  $e$  de la pièce sur le facteur d'intensité de contrainte  $K_C$  d'un matériau ductile.

4-69

## Utilisation du $K_{IC}$



### En conception

$$K_{IC} = \sigma_c \alpha \sqrt{\pi a} \quad (\text{si } \sigma_c < R_{e0.2})$$

Contrainte critique entraînant la rupture fragile d'une pièce

$$\sigma_c = \frac{K_{IC}}{\alpha \sqrt{\pi a}} \quad (\text{si } \sigma_c < R_{e0.2})$$

Longueur critique d'un défaut soumis à une contrainte

$$a_c = \frac{1}{\pi} \left( \frac{K_{IC}}{\alpha \sigma} \right)^2$$

CD: 4.4.5.

## Utilisation du $K_{IC}$ : Conception d'une pièce de céramique

Concevoir une plaque de céramique de 3 pouces de large, qui possède un facteur critique d'intensité de 9000 psi  $\sqrt{\text{in}}$  qui supportera une charge en traction de 40,000 lb. La pièce est testée par différentes méthodes non destructives pour vérifier qu'il n'y a pas de défaut (fissure) qui puisse entraîner la fracture.

Méthode de détection	Limite de détection de fissure (in)	Aire minimum (in <sup>2</sup> )	Épaisseur minimale (in)	Contrainte maximale (psi)
X-ray	0.020	1.11	0.37	36000
$\gamma$ -ray	0.008	0.70	0.23	57000
ultrason	0.005	0.56	0.19	71000

$$\sigma_{\max} = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi a}} = \frac{F}{A}$$

$$A = \frac{F\sqrt{\pi a}}{K_{Ic}} = \frac{(40000)(\sqrt{\pi})(\sqrt{a})}{9000}$$

$$A = 7.88\sqrt{a} \text{ in}^2$$

$$\text{donc } \text{épaisseur} = (7.88 \text{ in}^2 / 3 \text{ in})\sqrt{a}$$

Source: The science and Engineering of Materials, Donald R. Askerland, P.P. Phulé

4-71

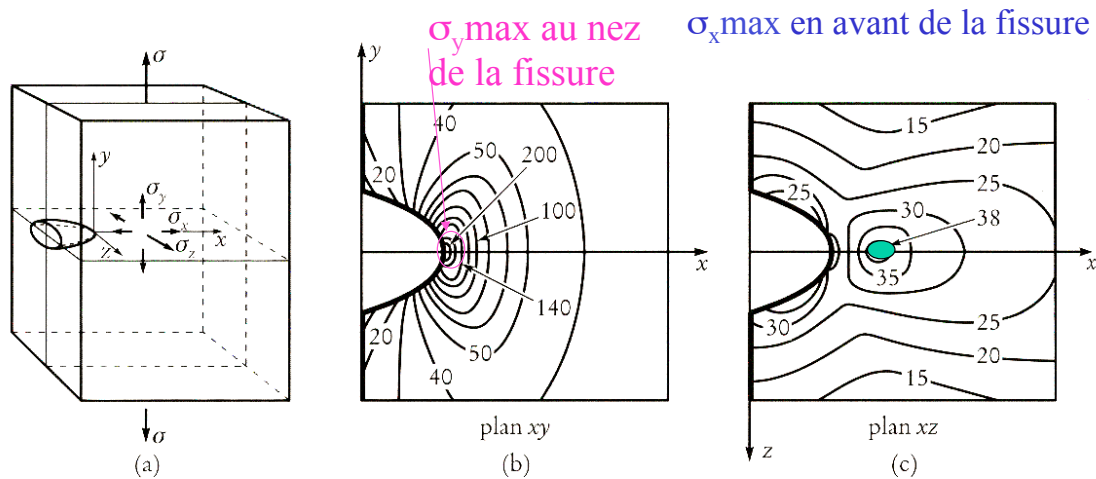
## Objectifs

- Rupture
  - Rupture ductile
  - Rupture fragile
- Ductilité
- Transition ductile-fragile
- Ténacité
  - Définition
  - Mesures
- Fracture
  - Concentration des contraintes :  $K_t$
  - Facteur d'amplification des contraintes
  - Comment améliorer la résistance à la fracture?

4-72



## Contraintes au fond d'une fissure

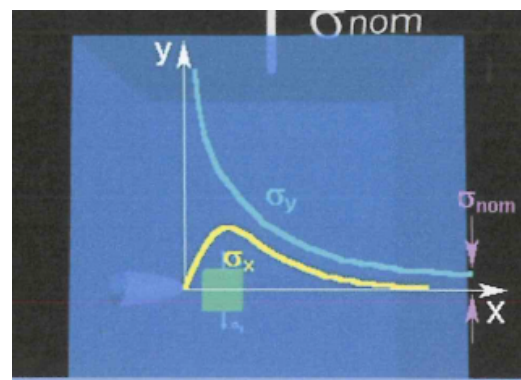
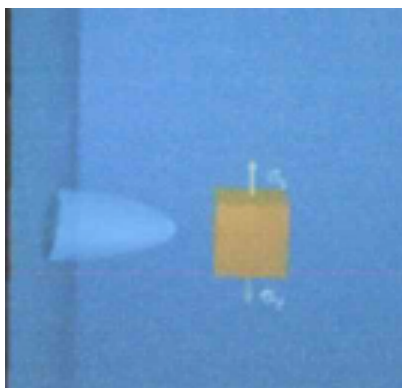


**Figure 4.38** a) Triaxialité des contraintes dans un cube élémentaire situé en fond de fissure. b) Courbes d'isoconcentration de la contrainte locale  $\sigma_y$  dans le plan xy. c) Courbes d'isoconcentration de la contrainte locale  $\sigma_x$  dans le plan xz (fissure de  $2\mu\text{m}$  de profondeur et de rayon de courbure égal à  $0,1\text{ nm}$ ).

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

4-73

## Contraintes au fond d'une fissure



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

4-74

## Arrêt de la propagation de fissure par interfaces

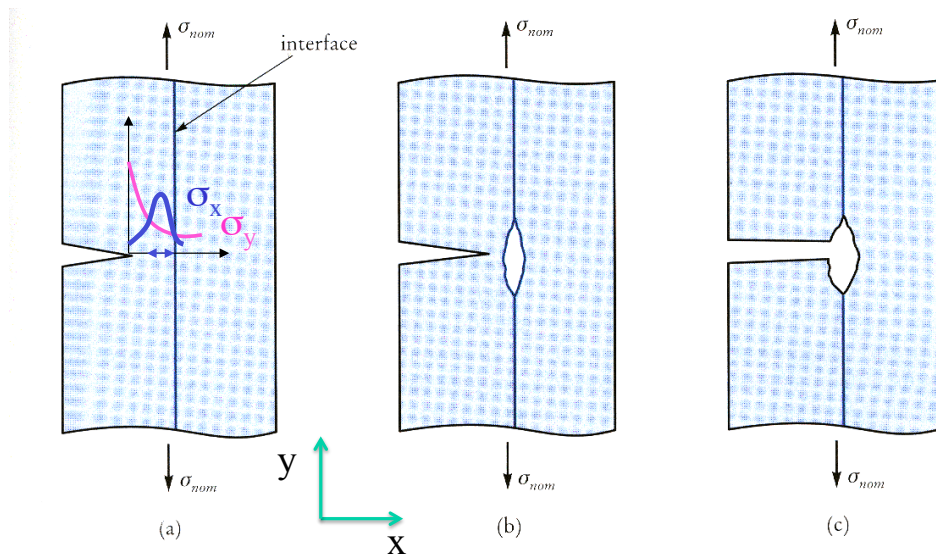


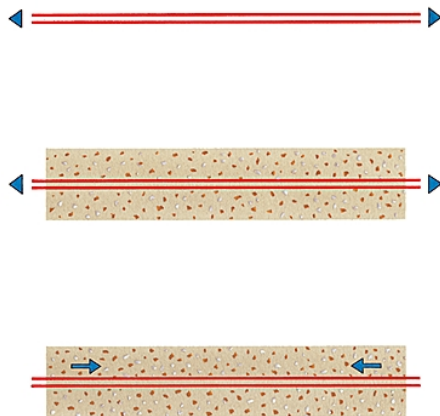
Figure 4.40 Mécanisme d'arrêt d'une fissure dans un matériau fragile qui renferme des interfaces à faible cohésion : a) fissure se propageant vers l'interface ; b) décohésion de l'interface ; c) émoussement du fond de la fissure dû à la décohésion de l'interface.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

4-75

## Amélioration de la ténacité par mise en compression du matériau

### Exemple : le béton précontraint



Le principe du béton précontraint consiste à armer un béton d'acier très fortement tendu qui, mettant en compression le béton, confère à l'ensemble des caractéristiques particulières de résistance et d'élasticité.

4-76

# Amélioration de la ténacité par création de contraintes résiduelles

## Exemple : le verre trempé

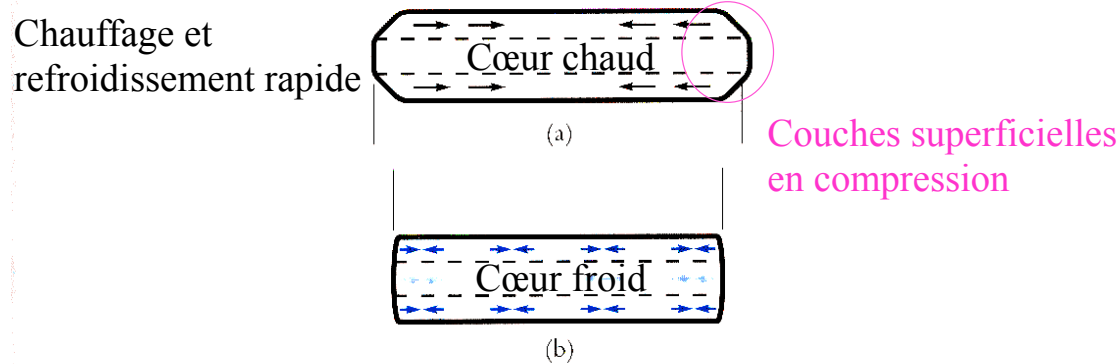


Figure 4.37 Après un chauffage uniforme, on refroidit rapidement le verre : a) les couches superficielles deviennent rigides et, en se contractant, elles déforment le cœur, toujours chaud et visqueux ; b) lorsque le cœur se refroidit à son tour, en se contractant, il soumet les couches superficielles à une compression.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

4-77

## Exercice

### EXERCICE 4-13

Le facteur critique d'intensité de contrainte  $K_{IC}$  est un paramètre qui caractérise la ténacité d'un matériau. Considérez un acier à haute résistance, utilisé pour la fabrication de pièces forgées. Le procédé de forgeage peut introduire des défauts (facteur géométrique  $\alpha = 1$ ), mais les méthodes d'inspection disponibles ne permettent pas de détecter des défauts dont les dimensions sont inférieures à 5 mm.

En considérant les caractéristiques mécaniques suivantes de l'acier, calculez la contrainte maximale de traction (en MPa) à laquelle pourra être soumise une pièce forgée.

Données:

- $R_{e0,2}$  : 1720 MPa
- $R_m$  : 2040 MPa
- $A$  : 12%
- $K_{IC}$  : 95 MPa.m<sup>1/2</sup> (95 MN.m<sup>-3/2</sup>)

$$K_{IC} = \alpha \sigma_{nom} \sqrt{\pi a}$$

$$\sigma_{max} = \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi a}} = 758 \text{ MPa}$$

4-78

## Que devrait-on comprendre ?

---

- Comment se fait la déformation plastique et pourquoi certains métaux sont plus ductiles que d'autres?
- Pourquoi la contrainte de cisson engendrant le glissement est-elle beaucoup faible que la contrainte théorique?
- Pourquoi et comment certains « défauts » permettent d'augmenter la limite d'élasticité du matériau?
- Pourquoi les propriétés mécaniques ( $R_e$ ,  $R_m$ ,...) ne sont pas des grandeurs exactes?
- Pourquoi faut-il éviter les congés et discontinuités géométriques sévères lorsque l'on design une pièce ?
- Pourquoi une fissure est-elle particulièrement dangereuse?
- Qu'il existe un paramètre permettant de quantifier la résistance à la propagation des fissures dans un matériau :  $K_{IC}$
- Comment, grâce à ce paramètre, on peut connaître la longueur max d'une fissure pour éviter la rupture brutale?